

論文・解説

15

モデルベース開発によるエンジン吸気温低減の取組み Intake Air Cooling with Model-Based Development

鈴野 浩大^{*1} 外菌 徹^{*2} 檜原 和晃^{*3}
Kohta Suzuno Tohru Hokazono Kazuaki Narahara
丸本 真玄^{*4} 前川 耕太^{*5}
Masaharu Marumoto Kota Maekawa

要約

エンジンの高圧縮比化では、高負荷運転時における異常燃焼の抑制が課題であり、吸気温の低減は課題解決に有効な要素の一つである。この実現に向け、従来から取り組んできたモデルベース開発に加え、最少の計算回数で効率的に解を得る解析技術を組み合わせ開発に取り組んでいる。まず、エンジン吸気系のモデルに対して逆解析の一手法であるアジョイント法による感度解析を行い、吸気温の低減に対して効果的な冷却部位をバックキャストで見出した。次に、得られた知見を基に吸気温の低減効果を CAE・実験により検証し、エンジンルームへの効率的な導風要件及び吸気ポート断熱構造要件を導いた。一連の検討から、本研究で開発中の技術にはねらいどおり、吸気温の低減を実現できるポテンシャルがあることを確認した。

Summary

This paper presents the development of intake air cooling with model-based development. Since the temperature of the intake air affects the efficiency of internal combustion engine, the technology of intake air cooling could be a key factor for the realization of fuel-efficient cars and the greenhouse gas reduction. In this study, we develop novel technologies to lower the temperature of the intake air based on numerical simulations and the sensitivity analysis via the adjoint method. The effectiveness of these methods is validated through the measurement of the temperature of the intake air system in a test vehicle.

Key words : heat・fluid, intake and exhaust system, CFD, Adjoint method

1. はじめに

マツダは 2030 年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステナブル “Zoom-Zoom” 宣言 2030」を 2017 年に公表し、地球・社会・人の調和の実現を目指した技術開発を進めている。その中で特に地球環境問題の解決に関しては、温室効果ガスの大幅削減を目指し、小型軽量化な電動化技術と高効率内燃機関を実現するための技術開発に取り組んでいる⁽¹⁾。

内燃機関の熱効率向上に向けては、水添加⁽²⁾ や筒内壁温予測技術⁽³⁾ などさまざまな研究が進められており、それらと相補的な技術の 1 つに吸気温の低減技術がある。本論文ではその取り組みの概要について説明する。

2. 吸気温低減技術の重要性

本研究の目的は、内燃機関の熱効率向上に向けた吸気

温の低減技術を確立することである。ここで吸気温とは、エンジン筒内に流入する空気の温度を指す。吸気温の低減によって、内燃機関が従来から抱えてきた問題の一つである高負荷運転時における異常燃焼を改善することができ、その結果、高圧縮比化による熱効率向上、エンジントルク向上、NVH 性能向上といった性能向上が可能となる。このように、吸気温の低減は優れた燃費や加速性能、静粛性をクルマにもたらす重要な要素技術である。これを実現するために、従来から取り組んできたモデルベース開発（以下 MBD）⁽⁴⁾ に加えて逆解析を用い、効率的に解を導き出すプロセス革新を行いながら、吸気温低減技術の開発に取り組んでいる⁽⁵⁾。

3. 吸気温低減のための感度解析

3.1 吸気系の全体像と検討プロセス

ここでは、吸気系の昇温過程を踏まえた上で、MBD に

*1~5 技術研究所
Technical Research Center

よって吸気温の低減を効率的に検討するプロセスを説明する。

吸気温の低減を実現するには、吸気系に冷却または断熱機能を付加する必要がある。しかし、吸気系は経路が長くエンジンルーム内にはさまざまな熱源があることから、吸気の昇温過程は複雑である。Fig. 1 は本研究が対象としている自然吸気ガソリンエンジン用吸気系の全体像、Fig. 2 は吸気の流れと主要な伝熱経路を表したものである。車両前面からダクトによって吸入された空気は、吸気系を構成する各デバイスを通じたのち、吸気ポートを経てエンジン筒内へと至る。その過程で空気は吸気系周囲に存在するエンジンを始めとした各熱源からさまざまな伝熱経路を経て受熱し、数十度以上昇温する。

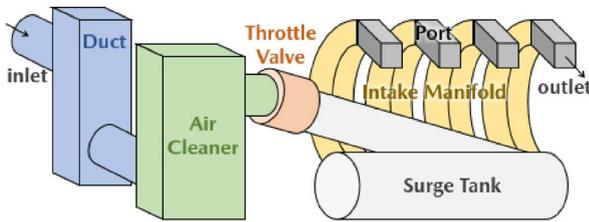


Fig. 1 Overview of Intake System

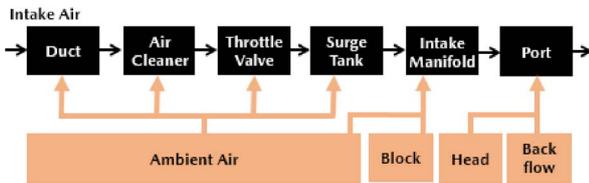


Fig. 2 Major Heat Path in Intake System

吸気温低減技術の開発においては、このような複雑な昇温過程をもつシステムに対して、効果的な冷却・断熱の方式や部位を見出す必要がある。しかし、上記の検討を実験的な試行錯誤によって行うことは開発効率の面で問題がある。そこで、この検討を効率化し開発スピードを向上させるために逆解析の一手法であるアジョイント法を活用し、吸気温の低減に対して効果的な冷却部位を見出し、その冷却効果を机上で定量的に見積もった。

この問題に対する MBD の活用には 2 つのアプローチが存在する。一つはパラメータスタディによる感度解析、もう一つはアジョイント法による感度解析⁽⁶⁻¹²⁾ である。前者は、吸気系の物理学的挙動を模擬する数値流体力学 (CFD) モデルを用い、冷却部位が異なるさまざまなケースについて吸気温を予測するシミュレーションを行う。それらの比較検討から、冷却部位の変更が吸気温にどのような変化をもたらすかを検討し、効果の高い冷却部位を見出すことが可能である。この方法は汎用性が高くさまざまなタイプのモデルに対して適用可能だが、その反面、規模の大きいモデルを用いた多数のシミュレーションを実行する必要があるため、検討に時間を要

するという側面がある。これに対して後者のアジョイント法による感度解析は、吸気系の CFD モデルそのものではなく、それを基にして数学的に生成されるアジョイントモデルの解析を通じて冷却部位と吸気温の関係を見出すものである。この方法は適用範囲に制限があるものの、アジョイントモデルを 1 回解析するだけで冷却部位と吸気温の関係すなわち冷却の感度が求まるため、計算回数を圧倒的に抑えることが可能である。解析に先立ち吸気系のモデル化手法を検討した結果、吸気系はアジョイント法の適用条件を満たす形でモデル化可能であることが分かったため、本研究では後者のアジョイント法による感度解析を用いた。

3.2 解析手法

アジョイント法による感度解析の概略を Fig. 3 に示す。入力 x に対して出力 y を与えるモデル f が与えられており、出力 y の良し悪しは評価指標 J によって定量的に評価されるとする。またアジョイント法を用い、モデル f を基にアジョイントモデル g をあらかじめ生成しておく。以上の基で、まず入力 x を用いてモデル f を解き、その結果出力 y を得る。次に、出力 y の良し悪しを評価指標 J によって定量化する。その上で、今度は評価指標 J をアジョイントモデル g に入力し、 g を解く。その結果から、感度 $\Delta J / \Delta x$ が得られる。ここでいう感度 $\Delta J / \Delta x$ とは、入力 x を Δx だけ微小変化させた時に評価指標 J がどの程度変化 ΔJ を示すかを表すものである。より正確かつ一般的な説明及び吸気系への適用については文献⁽⁵⁾ に詳細が与えられている。

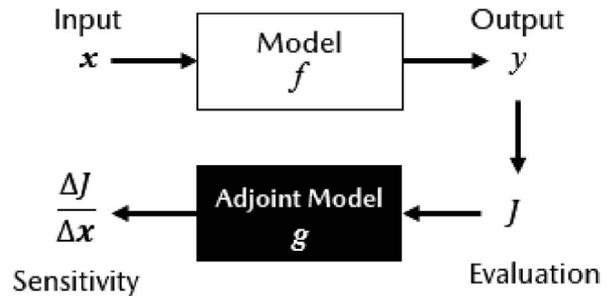


Fig. 3 Process of Sensitivity Analysis via Adjoint Method

以上を吸気系に適用した場合、入力 x は吸気の流入温度や吸気系の壁温分布、モデル f は吸気系の CFD モデル、出力 y は吸気温、評価指標 J は吸気温とその設計目標との差であり、感度 $\Delta J / \Delta x$ は吸気系の任意の場所の管壁面温度に変化 Δx を加えた際に吸気温がどの程度の変化 ΔJ を示すかを表す量である。感度が大きい部位ほど冷却効果の高い部位を示す。より一般化した表現をすると、評価指標 J は吸気系のあるべき姿と現状の設計案のギャップ、感度 $\Delta J / \Delta x$ はあるべき姿に近づくための施策を示唆

する量である。この解析手法は空力設計における車体形状最適化などの用途で広く研究されてきたが⁽¹³⁾、近年は上記の立場からこの手法を逆解析と称する場合もあり^(8,11)、出力から入力を求める逆問題^(7,14-16)の観点からも研究が進んでいる。

以下、本手法による吸気系の感度解析結果を示す⁽⁵⁾。なお、本検討で用いている解析条件は以下のとおりである。モデル形状は Fig. 4 に示す、自然吸気 2.0L ガソリンエンジン搭載車における吸気系形状とし、モデル f は吸気系内部の空気と熱の流れを記述するナビエ・ストークス方程式及びエネルギー保存則とする。走行シーンは外気温 25°C 下での車速 40km/h 中負荷定常走行とする。モデルの入力 x として、試験車両を用いて当該環境下にて計測した吸気系の管壁面の温度を与える。また評価指標 J は、第 4 気筒の吸気ポートにおける吸気温 T_{port} と設計目標値 T_{tgt} の二乗偏差 $|T_{port} - T_{tgt}|^2$ を用い、なおここで設計目標値 T_{tgt} は外気温と同一とする。アジョイントモデル g の生成及び解析は FlowDesigner2019 にて実行する。

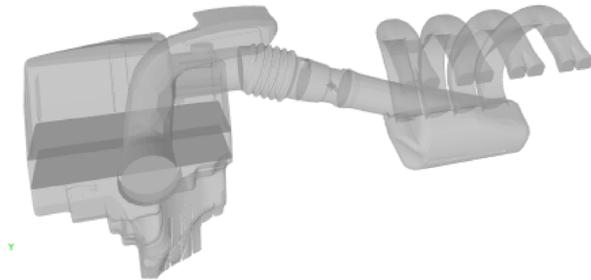


Fig. 4 Geometry of Intake System

3.3 解析結果

Fig. 5 は得られた感度を 3 次元モデル上にマッピングしたものである。ここでの感度は、吸気系の壁面温度を微小減少させた際に、第 4 気筒の吸気温がどの程度低減するかを表すものである。図は青いほど感度が大きいことを意味する。最も冷却感度が高い部位はサージタンクの車両中央寄り壁面、次いでインテークマニフォールド末端から吸気ポートにかけての管壁面となっている。

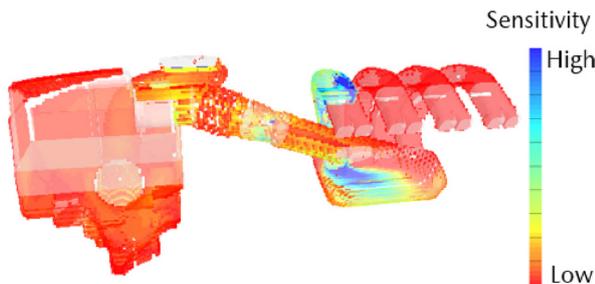


Fig. 5 Result of Sensitivity Analysis

次に、広範囲にわたって感度が高いサージタンクにつ

いて更に詳しく検討するため、サージタンク壁面上のいくつかの代表的な点における感度を定量的に評価する。その結果が Fig. 6 である。この図から、サージタンク壁面温度の感度は各部位ごとで大きな差があり、特定部位の冷却によって吸気温を効果的に低減できる可能性があることを示唆している。

ここで、得られた感度分布の妥当性を別の観点から考察する。Fig. 7 は吸気が壁面から授受する熱量を CFD モデルにより推定したものである。吸気が最も受熱するのはサージタンクであり、これは Fig. 5 の感度解析結果においてサージタンクが広範囲にわたって大きな感度を示していることと符合している。これらの結果はともにサージタンク内での昇温が吸気温に大きく影響していることを示唆するものであり、感度解析結果と熱収支に基づく分析結果は矛盾するものではないことがわかる。なおサージタンク壁面が高感度となる理由については、速度及び温度分布の観点からの考察が文献⁽⁵⁾に与えられている。

以上から、今回の解析条件の基で吸気温の低減に効果的な冷却部位はサージタンク、次いで吸気ポートだとわかった。

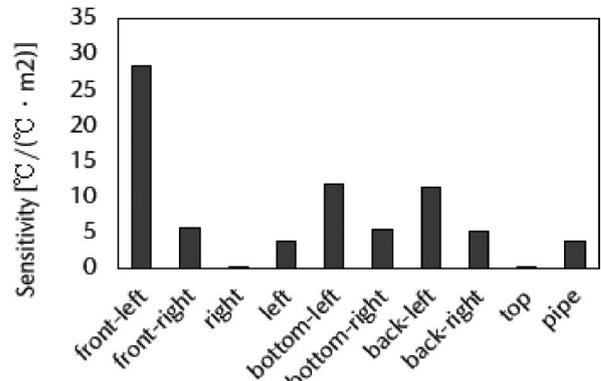


Fig. 6 Sensitivity Distribution on Wall of Surge Tank

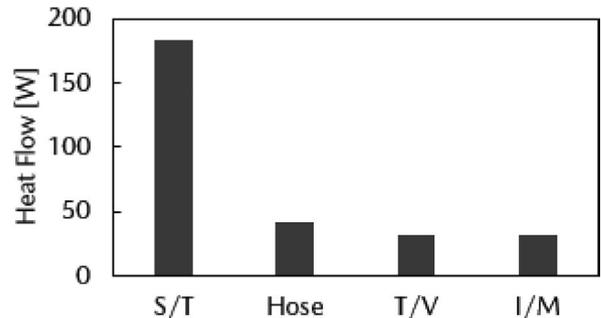


Fig. 7 Heatflow into Surge Tank, Hose, Throttle Valve and Intake Manifold

4. 冷却・断熱技術の開発

吸気温の低減を車両搭載状態において実現するための

具体的な手段について説明する。吸気温の低減を実現するには、感度解析から見出した高感度部位であるサージタンクや吸気ポート付近を冷却・断熱すればよい。ただし、冷却機器の付加はコスト、重量増加につながるため、最小限のシステム構成で効果が得られるものが望ましい。ここではその具体的手段として、外気を利用したサージタンク冷却、及び吸気ポート断熱の二つを検討した。

4.1 外気を効率的に用いるサージタンク冷却技術

前述の解析からサージタンクの壁温低減の重要性が示唆されたため、その実現手段を考える。サージタンク壁面の冷却には、エンジンルーム内に外気を導入することが効果的であるが、空力性能の悪化などの問題が生じる。そのため、最小限の導入風量で最大限の冷却効果を発揮する構造の具体化と検証を先行的に進めている。Fig. 8は、少量の外気導入によるサージタンク冷却の概念図である。エンジンルーム内にはシンプルな形状の導風構造を新たに設けており、これを用いて外気をサージタンク近傍に直接輸送し、サージタンクを局所的に冷却することをねらいとしている。前述の感度解析結果を踏まえ、本構造により導入された外気はサージタンク半面の冷却感度の高い部位を集中的に冷却するよう設置している。また、本技術では導入された外気の流量が車載ラジエータ通過風量比で5%程度となるように設定し、レイアウト面及び空力面での問題が極力生じないように配慮している。

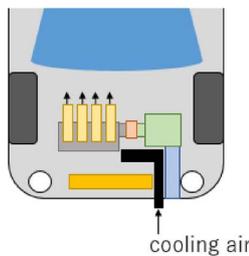


Fig. 8 Overview of Cooling

次に、吸気温の低減に対する効果を実験的に示す。上記の技術を実装した試験車両を用い、吸気温の計測を行った。ここで計測条件は前節の解析条件と同じく外気温 25°C下での車速 40km/h 定常走行としている。またエンジン負荷については、平地走行相当の低負荷、登坂相当の中負荷の2ケースで行い、この時ラジエータファンは未稼働状態である。その結果を Fig. 9 に示す。計測部位はサージタンク出口、第4気筒のインテークマニフォールド長手方向中央部、及び吸気ポート内部とし、各部を通過する吸気温度を熱電対により計測した。結果から、微小風量による冷却によりサージタンクにおいて 10°C強の吸気温の低減が確認でき、サージタンクより下流においても吸気温の低減が見られた。以上より、吸

気温の低減に対してはサージタンクの感度が高いことが確認された。今後、更に各性能要件を具現化していく。

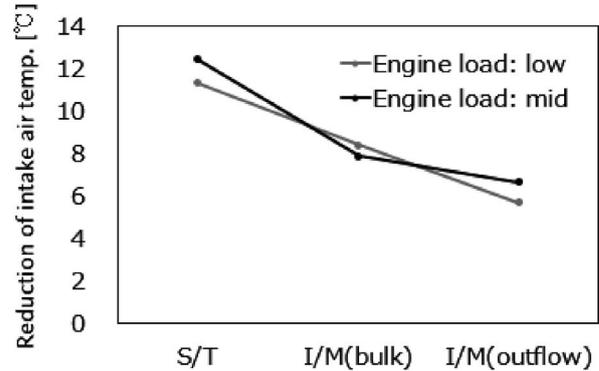


Fig. 9 Effect of Cooling

4.2 吸気ポート断熱技術

次に、吸気ポートの断熱による吸気温の低減効果について説明する。前述の感度解析の結果から、サージタンクに次いで、インテークマニフォールド出口から吸気ポートの壁温低減が吸気温の低減に大きく貢献していることが示唆されている。そこで、Fig. 10のように吸気ポートを断熱し、吸気を高温のポート壁から熱的に隔離することを考える。

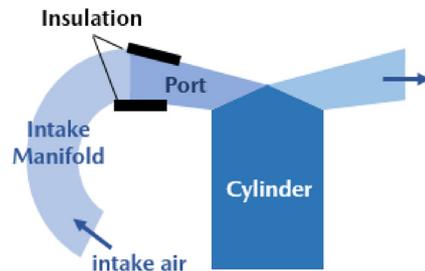


Fig. 10 Overview of Port Insulation

断熱材の主たる制御因子である厚さと熱伝導率について、それらの影響を1次元シミュレーションで試算した結果を Fig. 11 及び 12 に示す。なお解析の対象及び条件は、前節と同じく自然吸気 2.0L ガソリンエンジン搭載車における外気温 25°C下での車速 40km/h 定常走行、エンジン負荷は軽負荷及び中負荷相当の2種である。ここで用いた1次元モデルでは、吸気ポート形状は実機形状を模擬したものとし、吸気ポート内の流動、吸気ポート壁面と吸気との間の熱伝達、断熱材を含む吸気ポート壁内の熱伝導、吸気ポート壁面とエンジンクランクとの熱伝達をモデル化対象としている。断熱材厚みは吸気ポートに設置可能な3mm以下、熱伝導率は樹脂レベルから下限は空気相当の値までとした。ただし本検討では、断熱材のレイアウトによる充填効率等への影響は未考慮としている。なお Fig. 11 では断熱材の熱伝導率を 0.2W/(m・K)、Fig. 12 では厚みを 3mm としている。

結果をみると、断熱材の厚さを増すほど昇温は抑制されるが、低負荷・中負荷ともに、断熱材の厚さをその構造上の上限である 3mm とした場合でも見込まれる吸気温の低減効果は 2°C未滿にとどまる。さらなる昇温抑制のためには、断熱材の熱伝導率低減が効果的であり、空気相当に近づけることで、同条件で約 4°C吸気温を低減できる可能性がある。

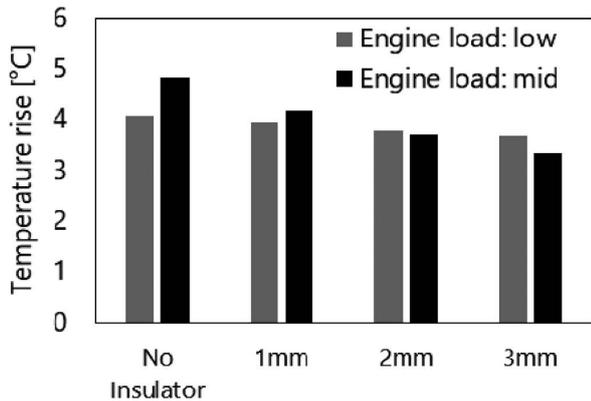


Fig. 11 Dependence of Temperature on Thickness of Insulator

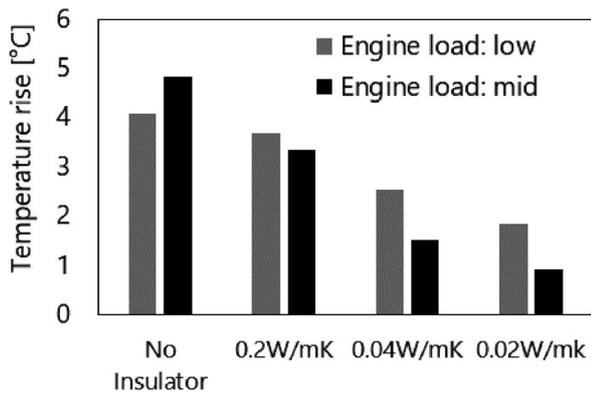


Fig. 12 Dependence of Temperature on Conductivity of Insulator

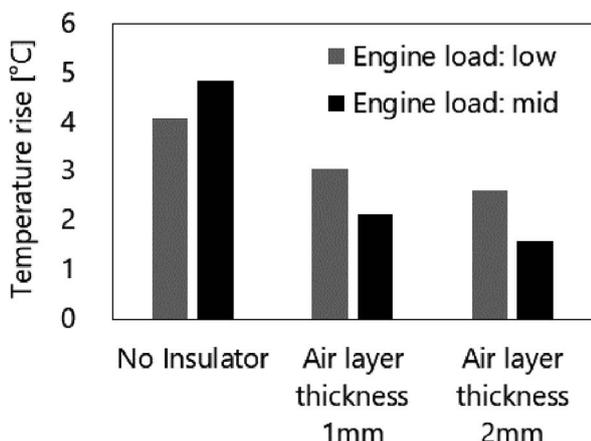


Fig. 13 Dependence of Temperature on Thickness of Air Layer Inside the Insulator

その実現手段の 1 つとして、断熱材を中空構造として内部に空気層を設けた場合のシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。断熱材の厚さは 3mm、熱伝導率は 0.2W/(mK) とし、空気層部分の厚さの影響を試算したものである。Fig. 12, Fig. 13 の結果から、空気層厚さを 2mm とすることで、熱伝導率 0.04W/(mK) の断熱材相当の効果があることが分かった。

以上から、サージタンク冷却、吸気ポート断熱が吸気温の低減に有効であることが確認された。

5. おわりに

本論文では、内燃機関の熱効率向上に向けた吸気温の低減技術の開発について、概要を紹介した。まず、吸気系を対象として、吸気温に対する吸気管の壁面温度の影響、すなわち感度を計算し、低減に効果が高いと思われる冷却部位を可視化した。次いで、解析結果に基づき、冷却・断熱効果が高いと思われる部位に対して冷却・断熱技術を適用した場合の効果を評価した。その結果、今回の検討条件下では、エンジンルーム内への外気導入構造により 10°C強、吸気ポート断熱構造により 4°C以上の吸気温低減が可能であることが示唆された。今後、導風構造の洗練やエンジン冷却系など、関連技術との組み合わせにより吸気温の低減効果を高め、高効率内燃機関をサポートすべく、技術開発を加速させる。

参考文献

- (1) MAZDA: ANNUAL REPORT (2019)
- (2) 葛晰遥ほか：高温高圧雰囲気場における水添加が自着火・燃焼反応におよぼす影響, [マツダ技報, No.36, pp.265-271 \(2019\)](#)
- (3) 山本亮ほか：高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術, [マツダ技報, No.35, pp.9-14 \(2018\)](#)
- (4) 藤川智士：マツダの目指すモデルベース開発, [マツダ技報, No.31, pp.44-47 \(2013\)](#)
- (5) 鈴野浩大ほか：逆解析によるエンジン吸入空気の冷却検討, 自動車技術会論文集 51 巻 4 号, pp. 707-712 (2020)
- (6) 桃瀬一成ほか：自然対流熱伝達問題に対する熱的境界条件の影響 (摂動随伴作用素表現に基づく数値解析), 日本機械学会論文集 B 編 63(614), pp.3347-3352 (1997)
- (7) 桃瀬一成ほか：対流熱伝達特性に対する熱および流れの境界摂動の影響 (随伴作用素表現に基づく数値解析), 日本機械学会論文集 B 編 66(646), pp.1473-1479 (2000)
- (8) 安部恒平ほか：随伴数値解析を利用した自然対流場の最適化, 日本機械学会論文集 B 編 70(691), pp.729-736 (2004)

- (9) 池島薫ほか：感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発（システムの概要と応用例），平成18年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.407-410（2006）
- (10) 桃瀬一成ほか：感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発（変分法に基づく感度解析），平成18年空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.403-406（2006）
- (11) 中川修一ほか：ノンパラメトリック感度解析を用いた産業車両におけるエンジンルームの熱管理手法，日本機械学会論文集 B 編 79(805)，pp.1774-1783（2013）
- (12) 露木義ほか：気象研究ノート第217号「気象学におけるデータ同化」，日本気象学会（2008）
- (13) 下川真之介ほか：Adjoint 法を用いた空力形状最適化の検討，Toyota technical review 63，pp.60-66（2017）
- (14) 久保司郎：逆問題，計算力学と CAE シリーズ 10，培風館（1992）
- (15) 登坂宣好ほか：逆問題の数理と解法，東京大学出版会（1999）
- (16) 土木学会：土木工学における逆問題入門，丸善（2000）